

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ОБЪЕМА ВНЕДРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТАХ

Введение

Мировой рынок продаж и услуг воздушных судов транспортной категории (ВС ТК), на котором присутствует весьма ограниченное число государств, включая Украину, характеризуется все возрастающей конкуренцией, успешное участие в которой предполагает постоянный рост весовой отдачи, надежности и ресурса, а также других эксплуатационных характеристик самолета [1, 2].

Анализ мирового опыта свидетельствует, что одним из эффективных направлений решений этой проблемы является постоянное увеличение объема применения в планере ВС ТК полимерных композиционных материалов (ПКМ) [3, 4].

Однако рост объема применения ПКМ сопряжен с рядом особенностей как на этапе проектирования изделия, так и на стадии реализации проекта в конкретных условиях производства, сопряженных с многими аспектами [5].

Поэтому весьма актуальной представляется комплексная задача разработки методов инженерного прогнозирования и научного обеспечения эффективного объема внедрения ПКМ в отечественных гражданских самолетах.

Основная часть

Проведен обзор и анализ мировых тенденций развития гражданских самолетов, основными из которых являются:

- повышение массовой отдачи самолета (весового совершенства);
- рост ресурса и надежности ВС ТК;
- увеличение геометрических размеров;
- повышение технологичности, обеспечивающее значительное снижение трудоемкости;
- снижение стоимости технического обслуживания путем увеличения контролепригодности и ремонтпригодности.

Реализация этих тенденций достигается в первую очередь перманентным ростом объема внедрения полимерных композитов в ответственных конструкциях агрегатов планера при ощутимом снижении применения традиционных металлов (рис. 1) [6, 7].

Показано, что рост этого объема сопряжен с необходимостью учета ряда особенностей ПКМ на этапах проектировании агрегатов и реализацией проекта в конкретных условиях производства.



Рисунок 1 – Рост объемов применения ПКМ в отечественных самолетах

В связи с этим актуальной проблемой является разработка методологии инженерного прогнозирования и научного обеспечения эффективного объема внедрения ПКМ в отечественных ВС ТК на разносрочные периоды. Анализ многочисленных публикаций, относящихся к проблеме методологии инженерного прогнозирования эффективных объемов применения ПКМ в ВС ТК, позволил выделить наиболее важные и актуальные ее составляющие (рис. 2).

Проведены обзор и анализ четырех понятий эффективности технических систем [8 – 10] и основанных на них критериев их оценки: праксеологическая, техническая, экономическая и стратегическая.

Анализ показателей праксеологической эффективности позволил установить их тождественность кроме двух: целевая эффективность $\sigma_W = \frac{W}{C}$ и экономичность результата $\eta = \frac{W}{N}$, где W – результат действия, C – цель действия (целевой эффект), N – затраты на достижение цели.

Таким образом, полная относительная праксеологическая эффективность выражается функцией

$$\bar{E}_{\text{пракс}} = f(\sigma_W, \eta) = f\left(\frac{W}{C}, \frac{W}{N}\right). \tag{1}$$

Показано [11], что функция (1) может быть реализована произведением относительных величин σ_W и η , т.е.

$$\bar{E}_{\text{пракс}} = \frac{W}{C} \cdot \frac{W}{N} = \frac{W^2}{CN}. \tag{2}$$

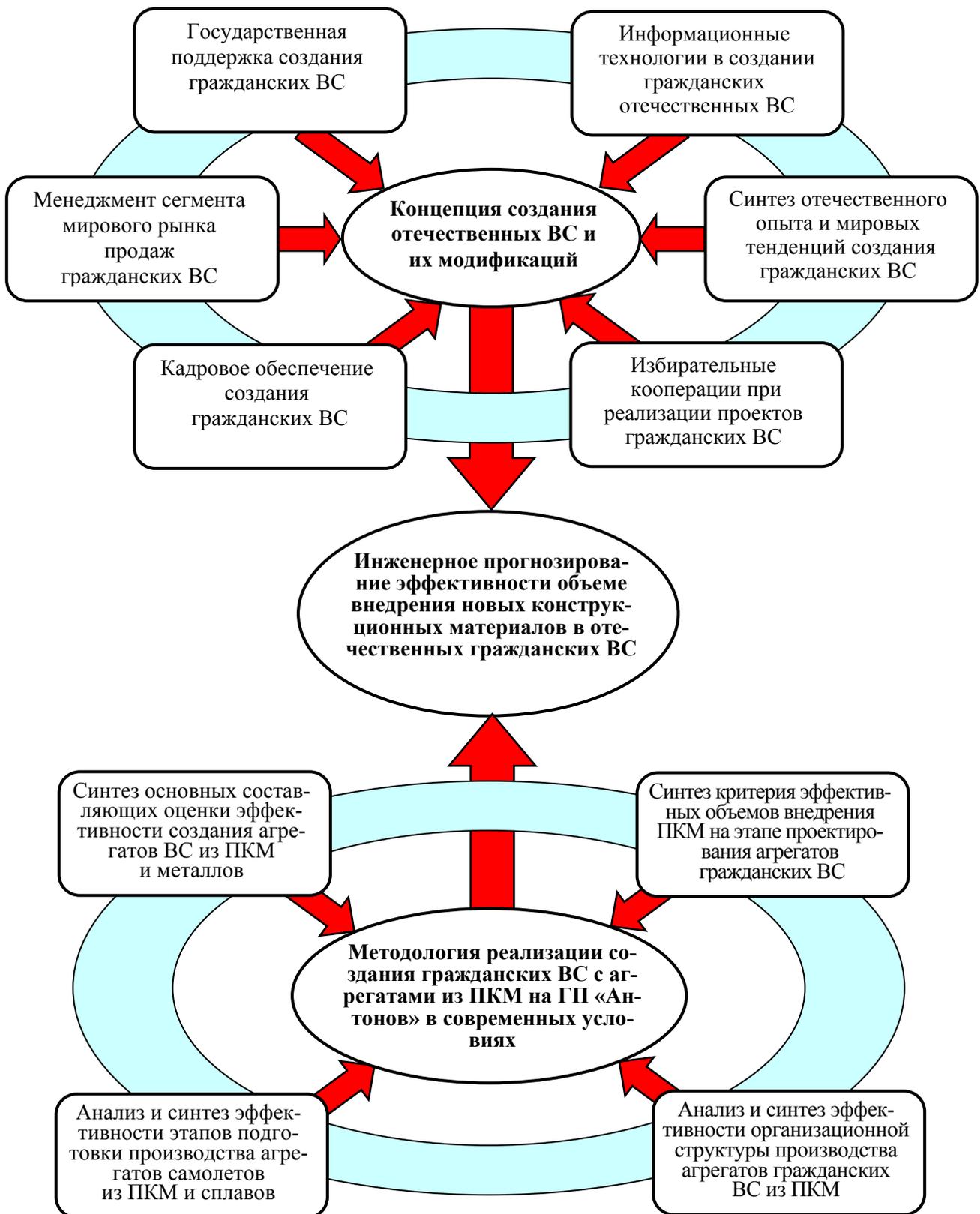


Рисунок 2 – Фрагмент блок-схемы состава методологии инженерного прогнозирования эффективного объема внедрения новых конструкционных материалов в конструкции отечественных гражданских самолетов

Техническая эффективность рассматривается в рамках стохастической и детерминированной математических моделей [8 – 10].

В случае детерминированной модели обобщенный показатель технической эффективности представляется в виде

$$\bar{E}_{техн} = \{ \bar{E}_{цт}, \bar{E}_{экт} \}, \quad (3)$$

где $\bar{E}_{цт}$ – показатель целевой относительной технической эффективности, $\bar{E}_{экт}$ – показатель целевой относительной экономичности технической эффективности,

Эти показатели имеют вид

$$\bar{E}_{цт} = \frac{W_K}{W_H}; \quad \bar{E}_{экт} = \frac{N_H}{N_K}. \quad (4)$$

Здесь конечный результат $W_K = W$, а нормированный конечный результат W_H можно отождествить в рамках ранее принятой терминологии с целью C , т.е. $W_H = C$. Нормированные затраты $N_H = [N]$, а конечные затраты $N_K = N$. Тогда вместо (4) получим

$$\bar{E}_{цт} = \frac{W}{C}; \quad \bar{E}_{экт} = \frac{[N]}{N}. \quad (5)$$

Отмечается, что при идеальном функционировании системы

$$W = C; \quad N = [N]. \quad (6)$$

Разделив первое равенство (6) на второе, получим

$$\frac{W \cdot [N]}{N \cdot C} = \bar{E}_{цт} \cdot \bar{E}_{экт} = 1. \quad (7)$$

В реальных случаях

$$\bar{E}_{цт} \cdot \bar{E}_{экт} = \bar{E}_{техн} \leq 1. \quad (8)$$

Так как на практике $W \leq C$ имеет место ограничение $N \leq [N]$, то, исходя из того, что $\bar{E}_{техн}$ не может быть больше идеального функционирования системы (7), следует при вычислении $\bar{E}_{техн}$ принимать во внимание только варианты W, C и N , при которых $\bar{E}_{техн} \leq 1$, максимально приближаясь к единице в правой части.

Экономическая эффективность является самым распространенным видом этой категории, определяемой как отношение результата действия W к понесенным затратам на его достижение N . Формальная запись этого соотношения совпадает с праксеологическим показателем экономичности результата [11]

$$\bar{E}_{экон} = \frac{W}{N}. \quad (9)$$

Содержательный состав показателей W и N в (9) различен в зависимости от области применения того или иного критерия экономической эффективности. Так, в критерии Томашевича Д.Л. результат является целевой отдачей самолета P за время его эксплуатации, N – суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию самолета.

Исходя из проведенного анализа можно констатировать, что в современных условиях жестко ограниченных ресурсов в самолетостроении, по-видимому, предпочтительным является критерий технической эффективности при планировании внедрения ПКМ в объеме 20...30 % от массы планера.

Проведенный анализ основных видов эффективности действий: праксеологической, технической, экономической и стратегической (престижной), ориентированный на предметную область внедрения ПКМ в конструкциях отечественных гражданских самолетов, позволил установить качественные зависимости того или иного вида эффективности от трех определяющих параметров: результата (результативности), цели действия и затрат, связанных с получением результата.

Установленные качественные зависимости, не отражая количественное значение относительного безразмерного параметра, позволяют отслеживать его рост или снижение от взаимного изменения размеров результата, цели и затрат, представленных в денежном выражении.

Показано, что праксеологическая и техническая эффективность действий содержат одинаковую целевую составляющую, отражающую степень достижения цели полученным результатом (рассогласование результата) и экономические составляющие, принципиально различные в данных видах эффективности.

Экономическая эффективность формально отражает одноименную составляющую праксеологической при отсутствии рассогласования результата и цели ($W/C = 1$).

Показано, что престижная эффективность формально может трактоваться как частный случай праксеологической при отсутствии рассогласования результатов и цели, а также ограничений на понесенные затраты ($W \gg N$).

Рациональность применения того или иного критерия эффективности внедрения конкретного объема ПКМ в гражданских самолетах сопряжена с необходимостью обоснованного учета для соответствующего этапа состояния и возможностей отечественного самолетостроения, основой которого является ГП «Антонов» со своей организационно-производственной структурой.

Разработан концептуальный подход к формированию комплексного критерия эффективности применения ПКМ на основных этапах проектирования и конструирования агрегата ВС ТК [12].

Этот критерий включает в себя пять взаимосвязанных стадий (этапов), показанных на рис. 3.

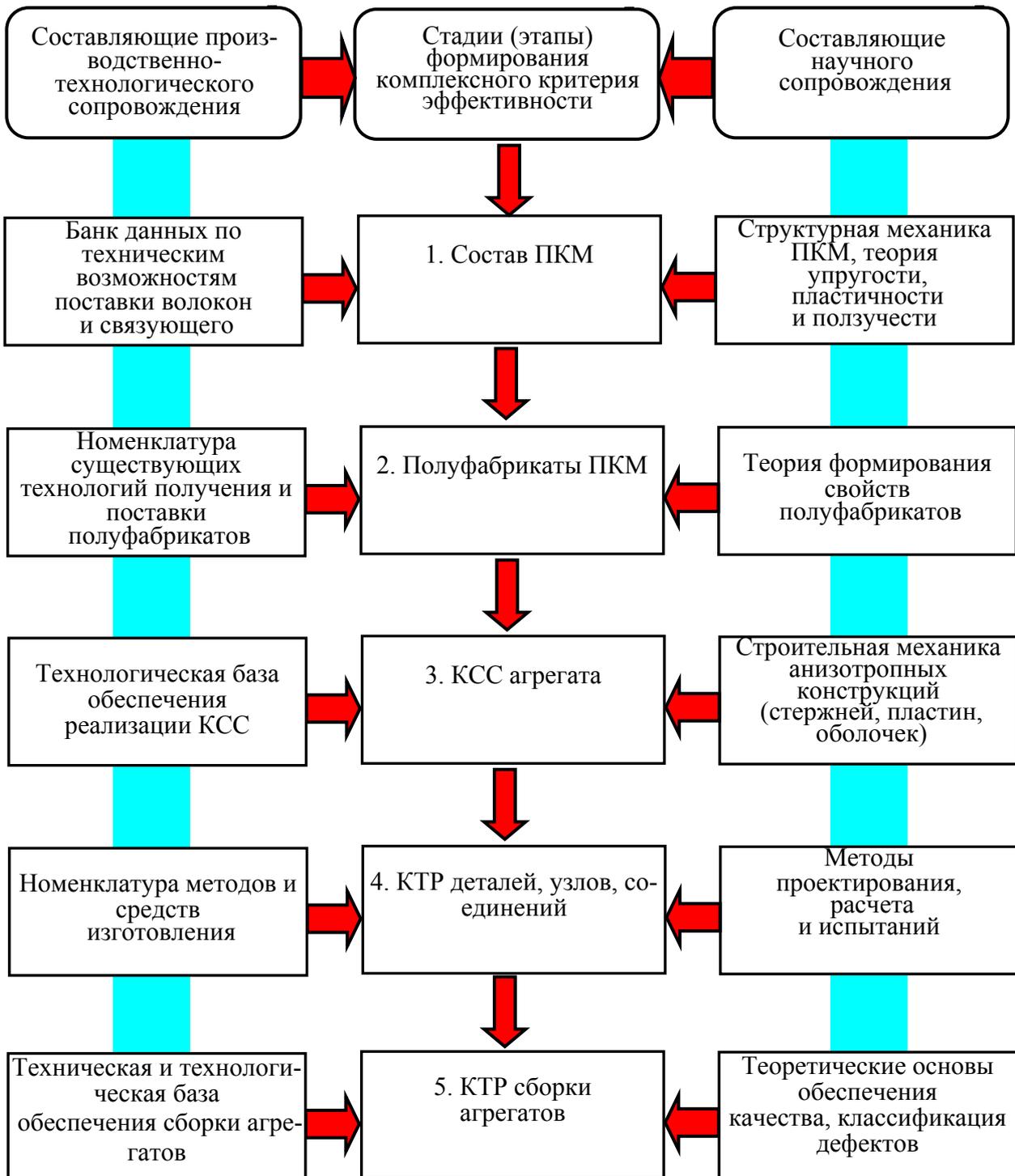


Рисунок 3 – Схема формирования комплексного критерия эффективности проектирования и конструирования агрегата воздушных судов из ПКМ

В схеме представлены также составляющие производственно-технологического и научного сопровождения, формирующие (синтезирующие) эти стадии комплексного критерия.

Относительный интегральный критерий эффективности планера самолета из ПКМ представлен в аддитивной форме:

$$\bar{K}_{\text{проект ПКМ}}^{\text{эф}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \xi_i \bar{K}_i^{\text{эф}}, \quad \bar{K}_i^{\text{эф}} = \frac{K_i^{\text{эф}}}{K_{i \text{ баз}}^{\text{эф}}}, \quad (10)$$

где ξ_i – доли вклада i -й составляющей относительного интегрального критерия эффективности ($i=1, 2, \dots, 5$); $\bar{K}_i^{\text{эф}}$ – относительный критерий эффективности i -й составляющей интегрального критерия, определяющий стадию (этап) его формирования.

Относительный критерий эффективности $\bar{K}_i^{\text{эф}}$ имеет также аддитивную форму:

$$\bar{K}_i^{\text{эф}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \psi_j \bar{K}_{ij}^{\text{эф}}, \quad (11)$$

где n – число различных составляющих ψ_j критериях $\bar{K}_i^{\text{эф}}$, относящихся к разным i (стадиям).

Доля вклада каждой i -й составляющей относительного комплексного критерия эффективности ξ_i ($i=1, 2, \dots, 5$) определяется экспертными оценками и зависит от вида проектируемого агрегата самолета из ПКМ и назначения самого воздушного судна или его модификации [13, 14].

Для каждой стадии (этапа) формирования критерия получены его аналитические зависимости от входящих технико-экономических параметров для каждого этапа, а также приведено соответствующее ему информационное сопровождение в виде таблиц, классификаторов долевых составляющих и формул, обеспечивающих необходимый материал для реализации критерия для каждого этапа.

В качестве примера в таблице 1 приведены долевые составляющие ψ_j ($j=1, 2, \dots, 6$) в доле вклада $\varphi_{3k\zeta}$ формирования комплексного критерия эффективности на этапе выбора КСС агрегата.

При этом относительные критерии эффективности этих этапов (10) в развернутом виде записываются как:

$$\bar{K}_{3j}^{\text{эф}} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 (\varphi_{3j1.1} \bar{K}_{3j1.1} + \varphi_{3j2.1} \bar{K}_{3j2.1} + \varphi_{3j3.1} \bar{K}_{3j3.1} + \varphi_{3j3.2} \bar{K}_{3j3.2} + \varphi_{3j3.3} \bar{K}_{3j3.3} + \varphi_{3j3.4} \bar{K}_{3j3.4} + \varphi_{3j4.1} \bar{K}_{3j4.1} + \varphi_{3j5.1} \bar{K}_{3j5.1} + \varphi_{3j6.1} \bar{K}_{3j6.1}) ; \quad (12)$$

$$\bar{K}_{4j}^{\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (\varphi_{4j1.1} \bar{K}_{4j1.1} + \varphi_{4j2.1} \bar{K}_{4j2.1} + \varphi_{4j2.2} \bar{K}_{3j2.2} + \varphi_{4j3.1} \bar{K}_{4j3.1} + \varphi_{4j4.1} \bar{K}_{4j4.1} + \varphi_{4j4.2} \bar{K}_{4j4.2} + \varphi_{4j4.3} \bar{K}_{4j4.3} + \varphi_{4j4.4} \bar{K}_{4j4.4}) . \quad (13)$$

Относительный критерий эффективности применения ПКМ в КТР конструктивных элементов агрегата представляется в форме

$$\bar{K}_{4j\zeta 4\zeta} = \frac{\frac{1}{3k} \sum_{j=1}^k K_{j \text{ доп ПКМ}}}{\frac{1}{3n} \sum_{r=1}^n K_{r \text{ доп Д16}}}, \quad (14)$$

где $K_{j \text{ доп ПКМ}}$, $K_{r \text{ доп Д16}}$ – балльные значения составляющих показателей долевых частей КТР конструктивных элементов, включенные в показатели уровней допусков на их реализацию в агрегате из ПКМ и Д16 соответственно; k , n – число показателей КТР элементов, учитываемых в критерии эффективности выделенных из всех классов дефектов синтезированного в работе [15] классификатора, фрагмент которого показан на рис. 4.

Таблица 1 – Долевые составляющие ψ_j в доле вклада $\varphi_{3j\zeta}$ формирования комплексного критерия эффективности на этапе выбора КСС

$K_{\text{КСС}}$	Долевые составляющие ψ_3 в $\varphi_{3k\zeta}$
1	1.1. Уровень сохранения эксплуатационных свойств полуфабриката в ходе технологического процесса формирования (реализации) КСС.
2	2.1 Уровень потенциальной возможности снижения массы агрегата, реализующей КСС.
3	3 Уровень обеспечения надежности агрегата в эксплуатации реализуемый КСС. 3.1 Уровень обеспечения безотказности, реализуемый КСС. 3.2 Уровень ремонтпригодности, обеспечиваемый КСС. 3.3 Уровень долговечности (ресурса) агрегата из ПКМ, обеспечиваемый КСС. 3.4 Уровень сохраняемости значений безотказности, ремонтпригодности и долговечности в течение и после хранения и транспортировки, обеспечиваемый КСС.
4	4.1 Уровень интегральной технологичности, реализуемый КСС.
5	5.1 Уровень технологической себестоимости агрегата, реализуемый КСС.
6	6.1 Уровень доступности реализации КСС.

На данном этапе информационного обеспечения балльная оценка уровня каждого дефекта может быть осуществлена только экспертным путем по одинаковой шкале для КТР КЭ агрегата из ПКМ и металла.

В формуле (14) она принята 3х-балльной: 1 – высокий уровень полей допусков (для слабонагруженного КЭ, не определяющего несущую способность агрегата); 2 – средний уровень полей допусков (приемлемый для средне нагруженного КЭ, практически не снижающий несущую способность агрегата); 3 – низкий уровень полей допусков (регламентируемый для КЭ, определяющих несущую способность агрегата).

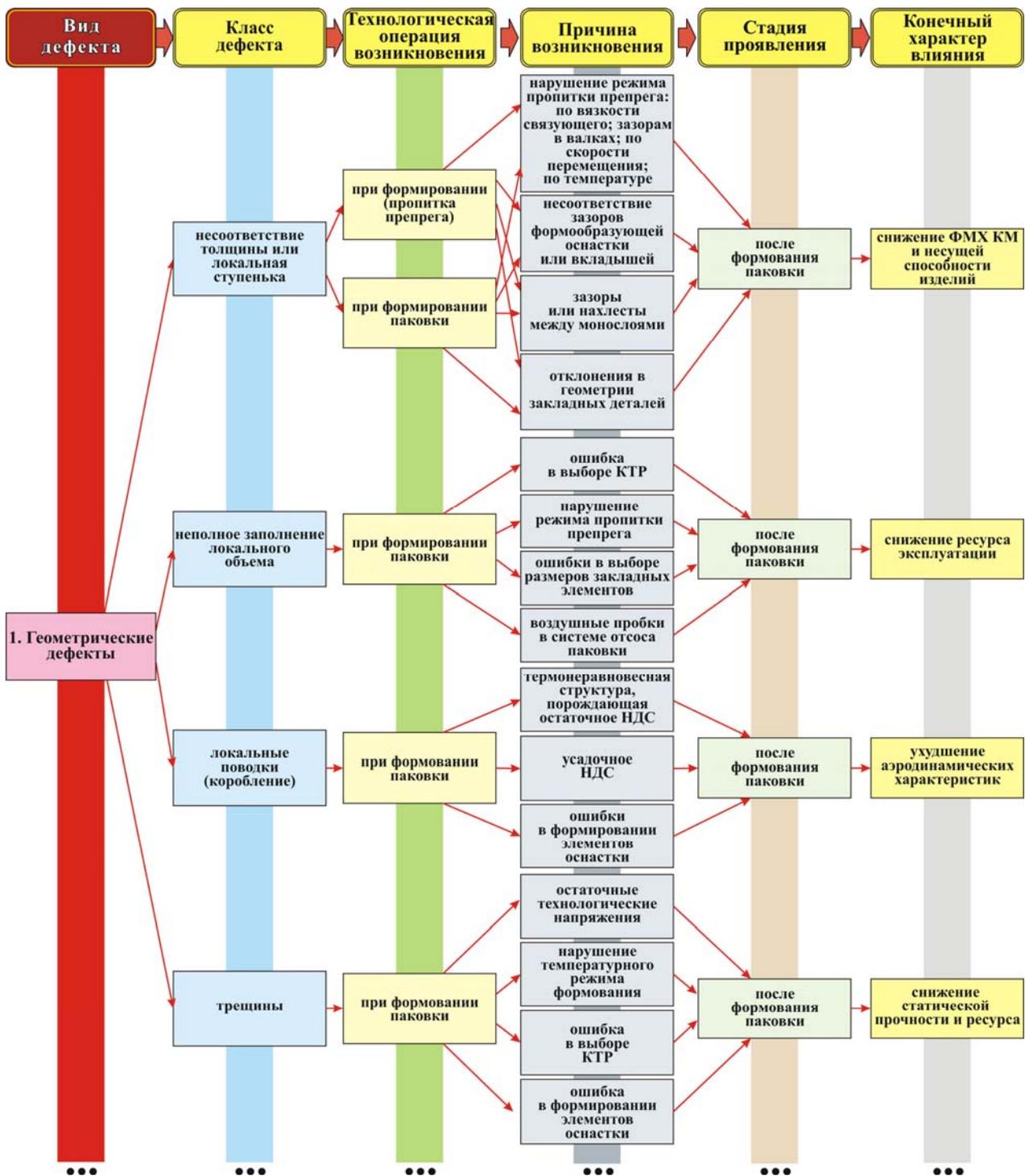


Рисунок 4 – Фрагмент классификатора дефектов, возникающих в производстве конструкций ВС ТК из ПКМ

Проведен анализ эффективности этапа технологической подготовки производства агрегатов ВС ТК из ПКМ [16]. Вскрыты предпосылки эффективности этапа ТПП композитных изделий и проанализированы КТР интегральных конструкций агрегатов из ПКМ [17]. Показано, что интегральные конструкции позволяют существенно снизить массу агрегата и стоимость, повысить технологичность реализации их КТР, сократив трудоемкость технологических процессов их сборки и длительность всего цикла изготовления.

Синтезированы основные составляющие общей проблемы создания авиаконструкций из ПКМ, перманентно решаемой самолетостроительными фирмами на каждом этапе производства новых самолетов (рис. 5). Эти составляющие тесно связаны с реализацией получивших дальнейшее развитие основных принципов создания авиаконструкций из ПКМ, предопределяющих взаимосвязь и взаимозависимость технологии, конструктивно-технологических решений, оборудования и оснащения в рамках определенной организационной структуры предприятия, создающего изделие из ПКМ.

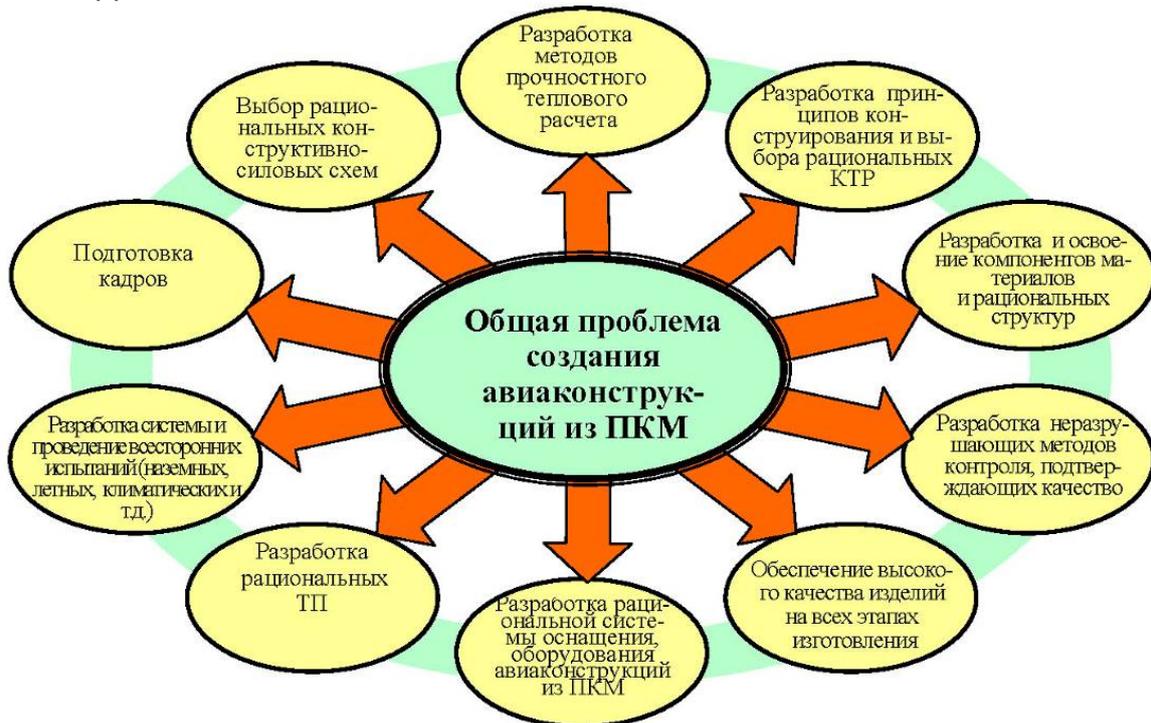


Рисунок 5 – Общая проблема создания авиаконструкций из ПКМ и основные направления ее решения

Приведены данные о методах и способах реализации принципов проектирования техпроцессов изготовления изделий АТ из ПКМ на ГП «Антонов», в совокупности обеспечивающих получение существенных результатов в области технологии их производства [18, 19].

Предложены принципы и ТП изготовления разнообразных авиационных конструкций из ПКМ на основе комплексной увязки свойств материалов, формообразующего оснащения и оборудования. Разработаны конструкции и технологии изготовления формообразующего оснащения из металла и ПКМ.

На основе анализа существующих источников, охватывающих монографии и регламентирующую документацию, синтезирована блок-схема основных взаимосвязанных составляющих комплекса ТПП авиационной техники (рис. 6), среди которых особое место занимают работы по обеспечению технологичности конструкций агрегатов самолета, наиболее полно отражающие регламентированное качество изделия.

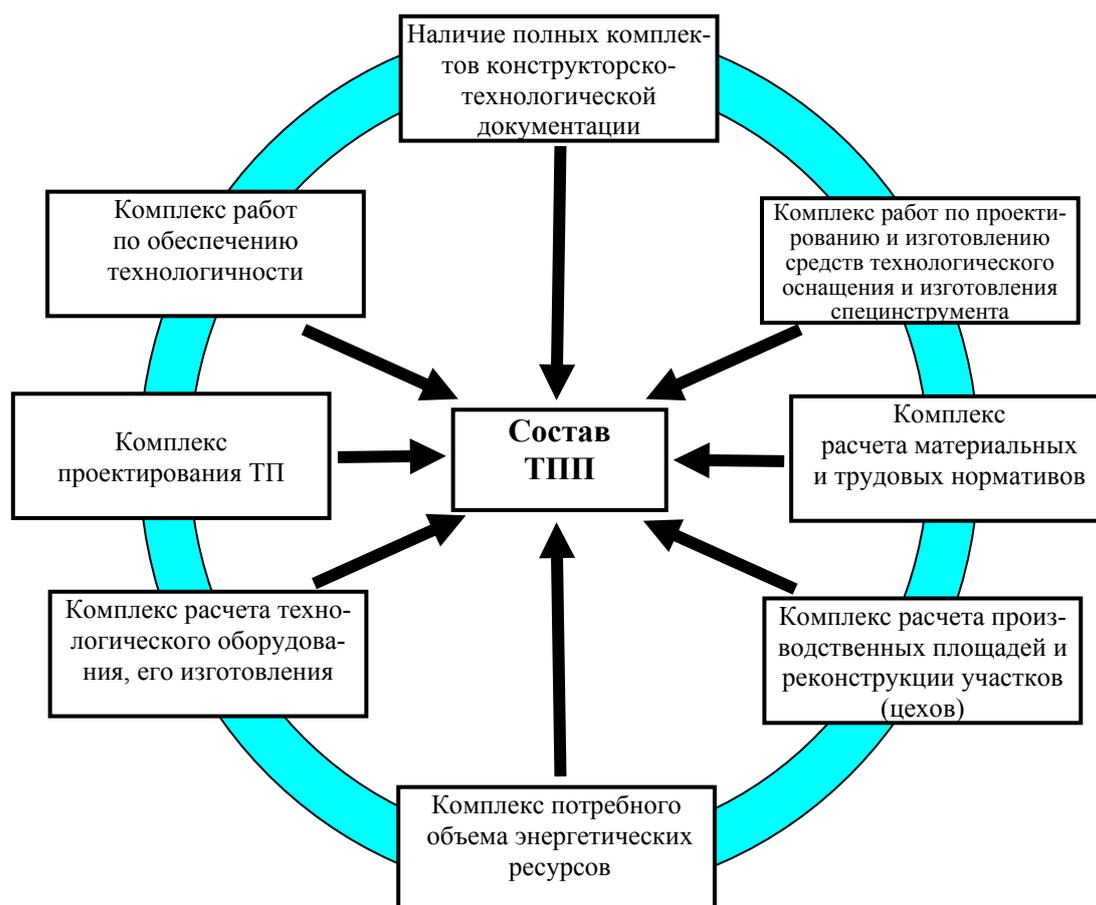


Рисунок 6 – Блок-схема основных составляющих комплекса технологической подготовки производства авиационной техники

Представлена декомпозиция комплекса технологичности, состоящего из взаимосвязанных составляющих. Эти составляющие образуют основной состав ТПП и формируют проектную (конструктивную), производственную и эксплуатационную компоненты общей технологичности изделия (рис. 7).

Разработан метод количественной оценки полной технологичности создаваемых конструкций агрегатов из ПКМ путем синтеза этих компонент, связанных установленными прямыми и косвенными связями, и реализующая его методика, основанная на экспертных оценках вкладов взаимного влияния составляющих проектной, производственной и эксплуатационной технологичности по десятибалльной шкале, перестраиваемой в промежуточном этапе на единичную. Это позволило существенно повысить точность экспертных оценок при большом массиве входящих параметров.

Общая технологичность изделия из ПКМ оценивается по формуле

$$T = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{r_{\bar{K}}} \sum \frac{\bar{K}_i \Phi_{\bar{K}_j}(\bar{K}_i)}{r_{\Phi_{\bar{K}(\bar{K})}}} + \frac{1}{r_{\bar{P}}} \sum \frac{\bar{P}_i \Phi_{\bar{P}_j}(\bar{K}_i)}{r_{\Phi_{\bar{P}(\bar{K})}}} + \frac{1}{r_{\bar{\mathcal{E}}}} \sum \frac{\bar{\mathcal{E}}_i \Phi_{\bar{\mathcal{E}}_j}(\bar{K}_i)}{r_{\Phi_{\bar{\mathcal{E}}(\bar{K})}}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{r_{\bar{P}}} \sum \frac{\bar{P}_i \Phi_{\bar{P}_j}(\bar{P}_i)}{r_{\Phi_{\bar{P}(\bar{P})}}} + \frac{1}{r_{\bar{\mathcal{E}}}} \sum \frac{\bar{\mathcal{E}}_i \Phi_{\bar{\mathcal{E}}_j}(\bar{\mathcal{E}}_i)}{r_{\Phi_{\bar{P}(\bar{\mathcal{E}})}}} + \frac{1}{r_{\bar{\mathcal{E}}}} \sum \frac{\bar{\mathcal{E}}_i \Phi_{\bar{\mathcal{E}}_j}(\bar{\mathcal{E}}_i)}{r_{\Phi_{\bar{\mathcal{E}}(\bar{\mathcal{E}})}}} \right] \quad (15)$$

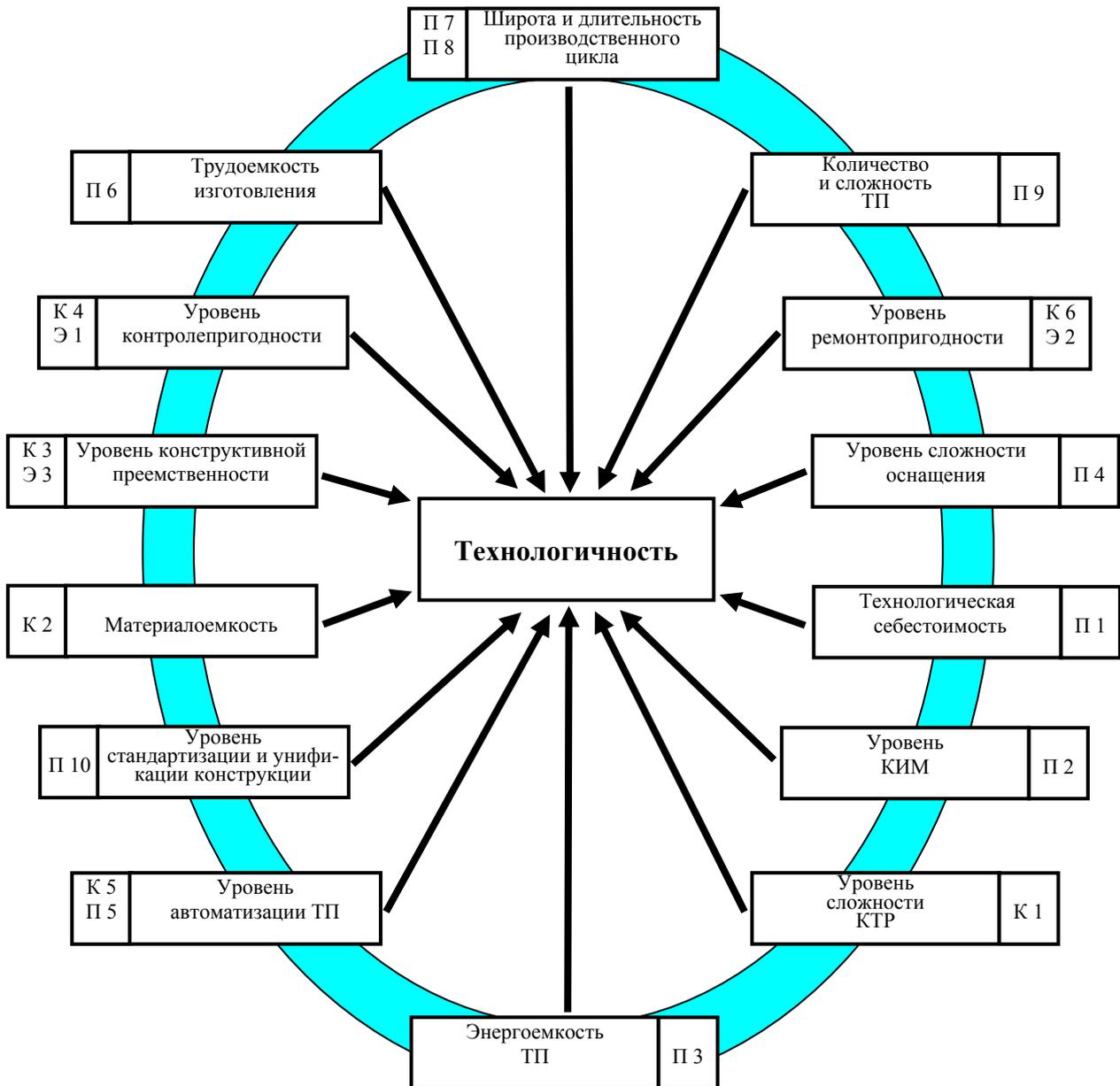


Рисунок 7 – Декомпозиция показателей технологичности

Здесь обозначено: r – размер бальной шкалы экспертных оценок ($r=10$); $r_{\bar{K}}$, $r_{\bar{П}}$, $r_{\bar{Э}}$ – коэффициенты приведения вкладов проектной, производственной и эксплуатационной технологичности к доле единицы; $r_{\varphi_{\bar{K}}(\bar{K})}$, $r_{\varphi_{\bar{П}}(\bar{П})}$, $r_{\varphi_{\bar{Э}}(\bar{Э})}$ – коэффициенты приведения коэффициентов взаимовлияния показателей проектной, производственной и эксплуатационной технологичности к долям единицы; $r_{\varphi_{\bar{П}}(\bar{K})}$, $r_{\varphi_{\bar{Э}}(\bar{П})}$, $r_{\varphi_{\bar{П}}(\bar{Э})}$ – коэффициенты приведения коэффициентов влияния показателей $\bar{П}$ на \bar{K} , $\bar{Э}$ на \bar{K} и $\bar{П}$ на $\bar{Э}$ к долям единицы. Коэффициенты r введены для приведения коэффициентов влияния к единой базе (единице), что позволяет в исходных экспертных оценках не прибегать к введению трудно реализуемых экспертами показателей в сотых и тысячных долях единицы, а на

заключительной стадии оценивания располагать оценками высокой точности.

Аналогичным образом определяется полная технологичность базового варианта конструкции $T_{баз}$ [16].

Эффективность нового варианта конструкции по уровню ее полной технологичности определяется как отношение

$$\bar{T}_{эф} = \frac{T}{T_{баз}} > 1. \quad (16)$$

Значения всех коэффициентов влияния как нового варианта конструкции, так и базового определяются экспертными оценками.

Достоинствами этого метода и реализующей его методики являются их представление в виде открытой системы, способной к расширению путем введения дополнительных составляющих или к свертыванию за счет исключения некоторых, менее значимых факторов полной технологичности.

Предложен также критерий эффективности ТПП агрегатов ВС ТК из ПКМ, в котором учтены основанные составляющие: степень автоматизации $A_{тп}$; уровень трудоемкости $K_{тр}$; уровень себестоимости K_c ; уровень материалоемкости $K_{мат}$; уровень компьютеризации $K_{комп}$; уровень качества ТПП $K_{кач}$; уровень технологичности $K_{техн}$; длительность цикла ТПП $K_{длит}$; степень безопасности и эргономичности $K_{без}$.

Критерий эффективности ТПП агрегатов ВС ТК из ПКМ $A_{эф тпп}$ имеет такую структуру:

$$K_{эф ТПП} = \frac{1}{8} (\varphi_{A_{тп}} A_{тп} + \varphi_{K_{тр}} K_{тр} + \varphi_{K_c} K_c + \varphi_{K_{мат}} K_{мат} + \varphi_{K_{комп}} K_{комп} + \varphi_{K_{кач}} K_{кач} + \varphi_{K_{техн}} K_{техн} + \varphi_{K_{без}} K_{без}) \geq 1, \quad (17)$$

где φ_i – коэффициенты значимости i -й составляющей K_i ($0 \leq \varphi_i \leq 1$), определяемые экспертным путем; K_i – относительные i -е составляющие критерия эффективности.

В соответствии с оговоренным выше принципом их формирования K_i имеют следующий вид:

$$A_{тп} = \frac{A_{тп}^{ПКМ}}{A_{тп}^{мет}}; \quad K_{комп} = \frac{K_{комп}^{ПКМ}}{K_{комп}^{мет}}; \quad K_{кач} = \frac{K_{кач}^{ПКМ}}{K_{кач}^{мет}}; \quad K_{техн} = \frac{K_{техн}^{ПКМ}}{K_{техн}^{мет}}; \\ K_{без} = \frac{K_{без}^{ПКМ}}{K_{без}^{мет}}; \quad K_{тр} = \frac{K_{тр}^{мет}}{K_{тр}^{ПКМ}}; \quad K_c = \frac{K_c^{мет}}{K_c^{ПКМ}}; \quad K_{мат} = \frac{K_{мат}^{мет}}{K_{мат}^{ПКМ}}. \quad (18)$$

Выявлены, обоснованы и проанализированы все основные факторы, которые формируют собой главный признак, определяющий объем применения ПКМ.

Проанализированы известные методы инженерного прогнозирования, из которых обосновано использование метода экстраполяции с учетом особенностей отечественного самолетостроения и метода экспертных оценок, который позволил решить следующие задачи:

- синтеза всех основных интегральных факторов главного признака прогноза – объема применения ПКМ в конструкциях ВС ТК;
- установления характеристик функции изменения каждого интегрального фактора во временном периоде прогноза, в том числе численного значения этой функции в конце временного периода;
- назначения весовых коэффициентов вклада каждого интегрального фактора α_i ($i = 1, 2, \dots, n$); $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

– установления весовых коэффициентов вклада всех составляющих интегральных факторов в главный признак прогноза β_j ($j = 1, 2, \dots, k$); $\sum_{j=1}^k \beta_j = 1$;

- вскрытия взаимосвязи (эквивалентности) стоимостных характеристик комплексных факторов с соответствующими составляющими несущей способности ПКМ в конструкциях ВС ТК.

Результатом решения первой из сформулированных выше задач явилась синтезированная схема составляющих факторов, формирующих главный признак, основные компоненты которых приведены на рис. 8, демонстрирующем структуру прогнозирования объема применения ПКМ в ВС ТК.

Система включает 10 взаимосвязанных основных факторов и их компоненты (составляющие). Ранг каждого фактора определяется с помощью двух уровней приближений на основе экспертных оценок двух групп экспертов, компетентность которых предопределяется целевой потребностью прогноза.

В работе [20, 21] даны обоснование и анализ всех факторов относительно их влияния на особенности прогнозирования эффективных объемов применения ПКМ в отечественных гражданских самолетах.

Предельно технически возможный объем применения ПКМ в ВС ТК определялся исходя из динамики мировых статистических данных его роста с 1965 года, образуя интерполяционный массив. Этот массив используется при синтезе двух классов аналитических функций, которые отвечают критерию высокой достоверности аппроксимации R^2 в интерполяционной области. При этом один из классов функций содержит точку максимального технически возможного объема применения ПКМ в экстраполяционной области прогноза.

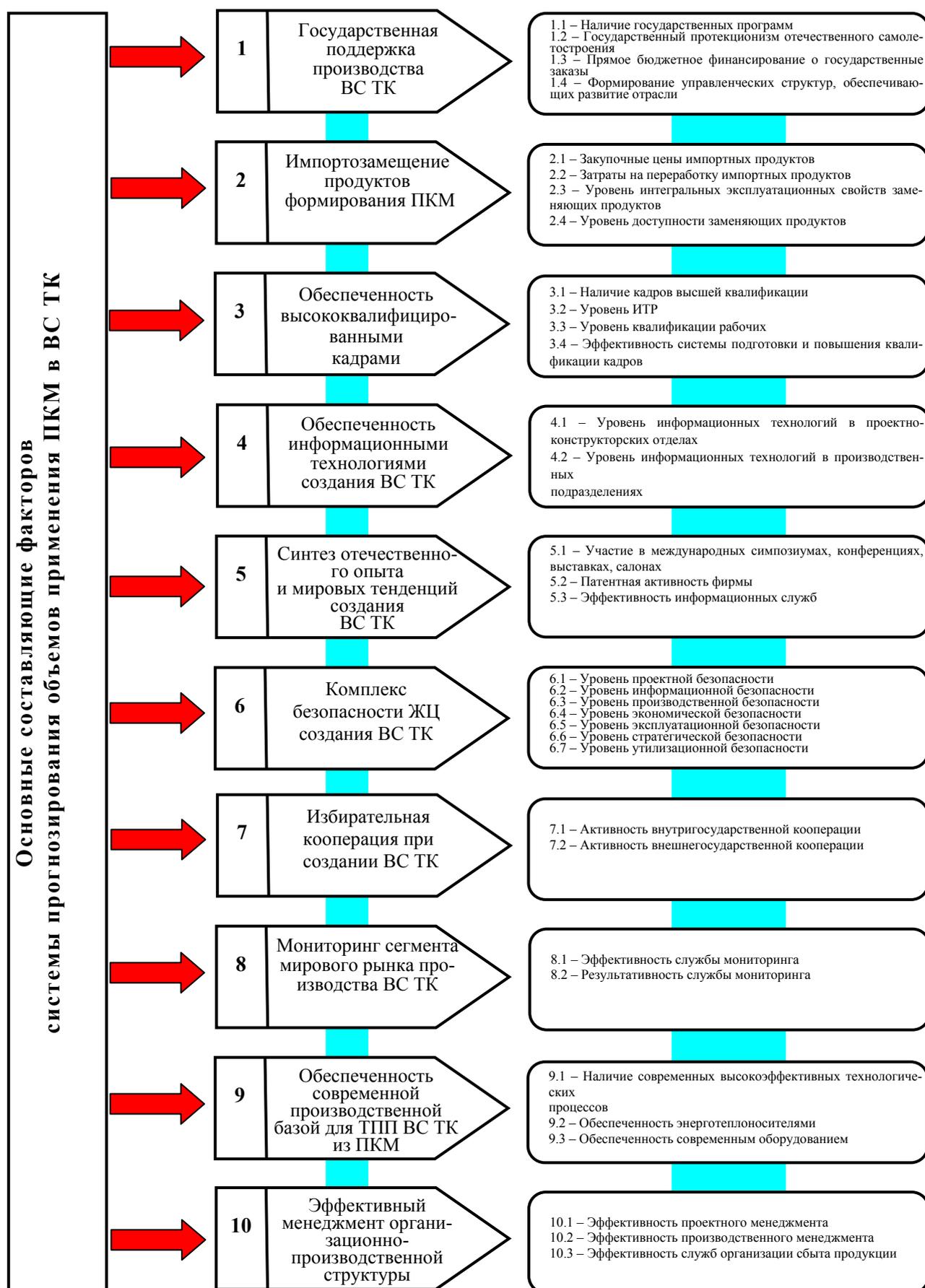


Рисунок 8 – Основные компоненты составляющих факторов, формирующих главный признак системы прогнозирования объемов ПКМ в ВС ТК

В классе функций, реализующих эту модель, нами установлены три [20, 21]:

$$f_1(\tau) = \frac{1}{a\tau^2 + b\tau + c}; f_2(\tau) = a(\sin b\tau - c) + 1; f_3(\tau) = \frac{a}{b + e^{-c\tau}}, \quad (19)$$

имеющие максимумы при определенных значениях коэффициентов a, b, c .

Доказано, что максимально возможный относительный объем применения ПКМ в ВС ТК лежит в пределах $0,8 < \bar{V}_{ПКМ} \leq 0,9$.

Исходя из этого диапазона в таблице 2 приведен прогноз сроков достижения объемов применения ПКМ 80 % и 90 %.

Таблица 2 – Прогноз сроков достижения объемов применения ПКМ

№ п/п	Уравнение аппроксимации	Достоверность аппроксимации	Год достижения
Прогнозируемый объем применения ПКМ 80%			
1	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,78\tau - 5,0987$	0,6081	2074
2	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,026\tau^2 + 0,5005\tau - 6,273$	0,7287	2029
3	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,0012\tau^3 - 0,0621\tau^2 + 1,2947\tau - 2,3219$	0,7646	2020
4	$\bar{V}_{ПКМ} = 3 \cdot 10^{-5} \tau^4 - 0,002\tau^3 + 0,0393\tau^2 + 0,156\tau + 0,9948$	0,7704	2022
5	$\bar{V}_{ПКМ} = 5,3 \exp(0,038\tau)$	0,6262	2037
6	$\bar{V}_{ПКМ} = \frac{1}{0,00002\tau^2 - 0,00312\tau + 0,13418}$	0,574	2043
7	$\bar{V}_{ПКМ} = 40(\sin(0,016\tau - 1,12) + 1)$	0,5380	2145
8	$\bar{V}_{ПКМ} = \frac{5,3}{0,0588 + \exp(-0,045\tau)}$	0,596	2075
Прогнозируемый объем применения ПКМ 90%			
1	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,78\tau - 5,0987$	0,6081	2087
2	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,026\tau^2 + 0,5005\tau - 6,273$	0,7287	2032
3	$\bar{V}_{ПКМ} = 0,0012\tau^3 - 0,0621\tau^2 + 1,2947\tau - 2,3219$	0,7646	2022
4	$\bar{V}_{ПКМ} = 3 \cdot 10^{-5} \tau^4 - 0,002\tau^3 + 0,0393\tau^2 + 0,156\tau + 0,9948$	0,7704	2023
5	$\bar{V}_{ПКМ} = 5,3 \exp(0,038\tau)$	0,6262	2039
6	$\bar{V}_{ПКМ} = \frac{1}{0,00003\tau^2 - 0,004968\tau + 0,1825}$	0,6918	2034
7	$\bar{V}_{ПКМ} = 40(\sin(0,026\tau - 1,46) + 1)$	0,6808	2085
8	$\bar{V}_{ПКМ} = \frac{5,3}{0,0588 + \exp(-0,045\tau)}$	0,596	2173

Выводы

1. Проведен обзор и анализ мировых тенденций развития пассажирского и транспортного самолетостроения, выявивший пути обеспечения эффективности самолетов рассматриваемого класса, а также роста применения ПКМ в агрегатах ВС ТК, как мощного резерва повышения эффективности их конструкции. Вскрыты вероятные причины этого роста: перманентное увеличение функциональных свойств полуфабрикатов и их номенклатуры, усиление роли научного обеспечения средствами информационных и компьютерных технологий, а также эффективных КТР. Сформулированы цель и задачи исследований.

2. Проведен анализ понятий эффективности технических систем и основанных на них критериев ее оценки при создании агрегатов ВС ТК из ПКМ. Установлено, что виды эффективности во многих аспектах в значительной степени взаимосвязаны и могут быть квалифицированы как иерархические.

3. Обоснован и разработан концептуальный подход к формированию комплексного критерия эффективности применения ПКМ на этапе проектирования и конструирования агрегата ВС ТК.

Предложена пятиуровневая схема формирования комплексного критерия эффективности, включающая в себя стадии выбора состава ПКМ, выбора полуфабрикатов ПКМ, формирования КСС агрегата, выбора КТР КЭ агрегата (деталей, узлов, соединений) и синтеза КТР сборки агрегата.

Для каждой стадии (этапа) формирования критерия получены его аналитические зависимости от входящих технико-экономических параметров, соответствующих каждому этапу, а также приведено соответствующее его информационное сопровождение в виде таблиц, графиков и формул, обеспечивающих необходимый материал для реализации критерия для каждого этапа.

4. Проведена декомпозиция комплекса технологичности, состоящего из взаимосвязанных составляющих, формирующих проектную (конструктивную), производственную и эксплуатационную компоненты общей технологичности изделия.

Установлены прямые и косвенные качественные связи между всеми составляющими компонент проектной, производственной и эксплуатационной технологичности, позволяющие формировать методику количественной оценки полной технологичности создаваемого изделия.

5. Предложен новый вариант метода сравнительного расчета полной технологичности авиационного узла или агрегата, основанный на экспертных оценках вкладов взаимного влияния составляющих проектной, производственной и эксплуатационной технологичности.

Реализующая его методика представляет открытую систему, способную как к дальнейшему расширению путем введения новых (допол-

нительных) составляющих, так и к свертыванию за счет исключения некоторых, представляющихся менее значимыми для той или иной конструкции и вида производства, составляющих факторов (параметров) компонент полной технологичности.

6. Синтезирован критерий эффективности ТПП агрегатов ВС ТК из ПКМ, включающий следующие основные составляющие: степень автоматизации, уровни трудоемкости, себестоимости, материалоемкости качества, технологичности, а также степени компьютеризации, длительности цикла ТПП и степени безопасности и эргономичности.

Определение конкретных значений входящих составляющих критерия эффективности ТПП связано с состоянием внедрения ПКМ в агрегаты ВС ТК отечественного производства, зависящего от принятой на уровне соответствующих государственных органов концепции развития отечественного самолетостроения, системы межгосударственной кооперации и ряда других немаловажных факторов, а также от выбора заменяемого объекта.

7. На основе углубленного анализа факторов, предопределяющих внедрение ПКМ, синтезирована система прогнозирования объемов использования композитов в отечественных ВС ТК на долгосрочные периоды.

В синтезированной системе установлены 10 взаимосвязанных основных факторов и составляющие их компоненты, проведен анализ этой системы, позволяющий в дальнейшем поступательно решать проблему долгосрочного прогнозирования этих объемов внедрения ПКМ в ВС ТК с учетом специфических условий отечественной отрасли.

8. Для установления ранга (уровня) каждого из факторов и их составляющих разработанной системы предложена универсальная генеральная определительная таблица (ГОТ) уровней значимости этих факторов, оцениваемых экспертной группой по пятибалльной шкале.

Ранг значимости составляющих системы, формирующей главный прогнозирующий признак, рекомендовано определять на основе двух уровней приближения в зависимости от целевой потребности анализа с использованием экспертных групп, ориентированных на различную глубину и широту их компетентности в сфере создания (проектирования и производства ВС ТК) из ПКМ.

9. Предложен и реализован подход к установлению предельно технически возможного объема применения ПКМ в ВС ТК, основанный на синтезе мировых статистических данных о динамике его роста с принятого за условный отсчет 1965 года, формирующей интерполяционную область, используемую для синтеза аналитических функций, и выбирающий критерии высокой достоверности аппроксимации R^2 в интерполяционной области и содержащую точку, соответствующую предельно возможному относительному объему применения ПКМ в ВС ТК.

10. Установлено два класса аналитических функций, один из которых обеспечивает только высокую достоверность аппроксимации R^2 в интерполяционной области статистических данных, но не содержит в себе точку максимально технически возможного относительно объема применения ПКМ в ВС ТК, а второй класс, имея ниже R^2 , содержит в качестве максимума $\bar{V}_{ПКМ}$ в экстраполяционной области прогноза.

11. Полученные в работе результаты в совокупности реализуют поставленную цель повышения массовой эффективности и надежности отечественных ВС ТК, обеспечивающих их высокую конкурентоспособность на международном рынке продаж и услуг путем реализации концепции эффективного объема применения ПКМ в конструкциях агрегатов планера самолета.

Список использованных источников

1. Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С., Нечипоренко О.Ю. Конструкционные материалы в самолетостроении. – Киев: КВИЦ, 2015. – 400 с.

2. Baker A., Dutton S., Kelly D. Composite Materials for Aircraft Structures. – Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Reston, 2004. – 599 p.

3. Бычков С.А., Бондарь В.Г., Король В.Н. Решение проблемы создания авиаконструкций из полимерных композиционных материалов на АНТК «Антонов» // Авіаційно-космічна техніка і технологія – 2003. – №5(40). – С. 34 – 37.

4. Гвоздев М.А., Кондратьев А.В. Прогнозирование технически возможного объема внедрения полимерных композиционных материалов в конструкциях самолетов // Технологические системы. – 2016. – № 1(74). – С. 7 – 13.

5. Бычков С.А., Гайдачук В.Е. Основные проблемы создания изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов: аналитический обзор // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 13.– X., 1998. – С. 6 – 17.

6. Бычков С.А., Коцюба А.А. Состояние и проблемы применения новых конструкционных материалов в отечественных гражданских самолетах в современных условиях. Сообщение 1. Подходы к выбору металлических конструкционных материалов самолетов // Авиационно-космическая техника и технология – 2016. – № 5(132). – С. 4 – 14.

7. Бычков С.А., Коцюба А.А. Состояние и проблемы применения новых конструкционных материалов в отечественных гражданских самолетах в современных условиях. Сообщение 2. Полимерные композиты в

отечественных гражданских самолетах в современных условиях (1995-2015 г.г.): первопричины и закономерности внедрения // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 6(133). – С. 4 – 14.

8. Гаспарский В. Праксеологический анализ проектно-конструкторских разработок: пер. с польск. /под ред. А.И. Половинкина. – М.: Мир, 1978. – 172 с.

9. *Praxiology and the philosophy of technology* / ed. W. Gasparski, T. Airaksinen. – New Brunswick and London: Transaction Publishers, 2008. – 299 p.

10. Гайдачук А.В., Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Коваленко В.А., Кириченко В.В., Потапов А.М. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: моногр. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.

11. Коцюба А.А., Кондратьев А.В. Сущность и содержание понятий эффективности в анализе перспективных объемов внедрения полимерных композиционных материалов в конструкциях отечественных гражданских самолетов // *Технологические системы*. – 2016. –4(77). – С. 20 – 28.

12. Коцюба А.А. Формирование критерия эффективности проектирования конструкций гражданских самолетов из полимерных композитов на этапе выбора их состава // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2016. – Вып. 3 (87). – С. 19 – 31.

13. Коцюба А.А. Формирование составляющих комплексного критерия эффективности проектирования агрегатов гражданских самолетов из полимерных композитов на основных этапах их создания // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2016. – Вып. 4 (88). – С. 22 – 36.

14. Коцюба А.А. Реализация критерия технической эффективности применительно к анализу конструкций агрегатов гражданских самолетов из полимерных композиционных материалов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2017. – Вып. 3 (91). – С. 7 – 14.

15. Гайдачук А.В., Кондратьев А.В., Омельченко Е.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №3(70). – С. 11 – 20.

16. Коцюба А.А. Формирование эффективности этапа технологической подготовки производства агрегатов гражданских самолетов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 2(137). – С. 60 – 70.

17. Коцюба А.А. Анализ эффективности конструктивно-технологических решений агрегатов воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов ГП «Антонов» и реализующих их технологий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2016. – Вып. 2 (86). – С. 7 – 14.

18. Коцюба А.А., Двейрин А.З., Головченко Я.О. Новые конструктивно-технологические решения соединений композитных изделий в практике ГП «Антонов» // Технологические системы. – 2016. – №1(74). – С. 19 – 26.

19. Андреев А.В., Головченко Я.О., Коцюба А.А. Современные конструктивно-технологические решения агрегатов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов и их реализация на предприятии Stelia Aerospace // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2015. – Вып. 4 (84). – С. 95 – 104.

20. Коцюба А.А., Кондратьев А.В., Кириченко В.В. Методология прогнозирования объемов применения полимерных композиционных материалов в отечественных гражданских самолетах на долгосрочные периоды // Технологические системы. – 2017. – №3(80). – С. 59 – 70.

21. Коцюба А.А., Кондратьев А.В. Синтез системы прогнозирования объемов применения полимерных композиционных материалов в отечественных гражданских самолетах на долгосрочные периоды // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2017. – Вып. 2 (90). – С. 7 – 23.

Поступила в редакцию 28.11.2018.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,
ГП «Антонов», г. Киев.*